

IMPACTO DE LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS AL AIRE ATMOSFÉRICO EN LOS PROCESOS DE PRECIPITACIÓN Y SU MODIFICACIÓN ARTIFICIAL BENÉFICA

Dr. Ing. y Lic. en Física **Raúl César Pérez**¹.

¹Dpto de Materias Básicas. Facultad Regional Mendoza (FRM).
Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Mendoza 5500. Argentina.

rcperez@frm.utn.edu.ar - rcperez@gmail.com

RESUMEN:

Uno de los procesos más importantes en la caracterización del clima de una determinada región del planeta son sus precipitaciones. Por esta razón, el cambio que se pueda producir sobre ellas impactará directamente en las características del clima de la región en cuestión.

De las actividades antropogénicas que influyen en el cambio de regímenes y/o tipos de precipitaciones, la emisión de partículas sólidas (CCN) es la que produce mayor impacto en la modificación de sus procesos naturales.

Los dos factores de mayor influencia en la modificación de las precipitaciones por emisión de partículas son: sus tamaños individuales y su concentración, estas dos características de la *pluma* emitida son fundamentales en el tipo de impacto que producirá.

Para mitigar y modificar benéficamente este tipo de procesos, existen metodologías operativas eficaces en todo el mundo capaces de revertir esta situación. El más utilizado y reconocido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) es el método de **siembra de nubes**.

Su modelo conceptual teórico y sus diferentes implementaciones operativas han conseguido innumerables éxitos en el combate de este tipo de impactos ambientales

Palabras clave: modificación de las precipitaciones * siembra de nubes. * impactos climáticos.

1. Introducción

Es conocido en el estudio de los impactos climáticos, que los cambios en los procesos de precipitación respecto de los naturales, son los de mayor influencia para que esto suceda. Por ello, es importante estudiar las emisiones de partículas al aire atmosférico debido a las actividades antropogénicas, ya que es el factor principal para que esto ocurra.

En base al conocimiento adquirido por los científicos especialistas en la temática, se han desarrollado eficientes metodologías operativas para mitigar este tipo de impactos satisfactoriamente.

1.1 Importancia del radio crítico R_c

Cuando se hace referencia a la influencia del tamaño de las partículas sólidas emitidas a la atmósfera que producen cambios en las precipitaciones, el radio crítico juega un rol fundamental en estos procesos, debido a que representa un

valor umbral respecto del radio inicial de la gota de nube que se forma. Según la ecuación de la teoría de Kelvin, su expresión matemática es⁹:

$$R_c = \frac{2\sigma}{n_l k_B T \ln(\frac{e}{e_s})} \quad (1)$$

En esta ecuación, σ es la tensión superficial de la gota, n_l es el número de moléculas de agua líquida en el interior de la gota, k_B la constante de Boltzman, T la temperatura del aire atmosférico circundante, e la presión de vapor del aire atmosférico y e_s su presión de vapor de saturación. Se puede apreciar que el valor de radio crítico depende de varios parámetros de la termodinámica del aire atmosférico, los cuales pueden cambiar en el tiempo y en consecuencia el mismo valor del radio crítico puede cambiar para un mismo día, cambiando las posibilidades de que las nubes y las precipitaciones se formen.

En otras palabras, se puede afirmar que cuando una gota de nube comienza a formarse, existen siempre dos procesos presentes en la atmósfera: los mecanismos de evaporación y de condensación que compiten entre sí. Que sobreviva la gota, y en definitiva la nube, dependerá de cuál de estos procesos triunfe. Es en esta situación donde el valor del radio crítico se torna importante, porque si la gota de nube que se forma tiene un radio cuyo tamaño es inferior al del radio crítico, entonces los procesos de evaporación triunfarán y la nube no sobrevivirá. Por el contrario, si la dimensión del radio de la gota recién formada supera al valor crítico, los procesos de condensación se impondrán, y la gota crecerá y un tiempo posterior caerá por su peso, iniciando la precipitación.

Un aspecto importante que se debe considerar en el mecanismo de formación de las gotas de nubes expuesto, es que de acuerdo con la ecuación (1) es imposible que en la atmósfera se forme una gota por un simple proceso de condensación por **nucleación homogénea**. Esta afirmación se fundamenta en el hecho de que, para un aire atmosférico saturado en un ciento por ciento, el radio crítico tiene un valor infinito, por lo que ninguna gota podrá formarse en esta situación. Es por esto que el proceso natural de formación de gotas de nube es **heterogéneo**, es decir, la formación se produce cuando la molécula de vapor de agua toma contacto con la superficie de cualquier partícula sólida existente en el aire atmosférico y condensa súbitamente, y si el valor de su radio es superior al del radio crítico comenzará una etapa de crecimiento hasta la precipitación.

Lo expuesto es el fundamento del impacto en los procesos climáticos que producen las partículas emitidas a la atmósfera, especialmente en aquellos relacionados a precipitaciones. Porque toda partícula producida por las actividades antropogénicas en el aire atmosférico, competirá con los núcleos naturales existentes en el lugar en la formación de gotas de nubes como en la posterior precipitación. De modo que las partículas emitidas, en función de su cantidad y tamaño, pueden modificar los regímenes naturales de formación de nubes y sus correspondientes precipitaciones posteriores, de acuerdo con el

⁹ R. C. Pérez, *Física de los fenómenos atmosféricos y meteorológicos*. Pag. 136

valor del radio crítico para las condiciones atmosféricas existentes y la concentración de la emisión.

1.2. Influencia del número crítico N_c de partículas emitidas por unidad de volumen del aire atmosférico.

Como se expuso anteriormente, cuando se estudia el impacto en los procesos climáticos debido a la emisión de partículas sólidas a la atmósfera, además de considerar su tamaño respecto del valor del radio crítico otra importantísima característica a evaluar es su número de partículas por unidad de volumen de la emisión. Este es un factor con tanta influencia en los cambios de las precipitaciones como el tamaño de las partículas emitidas. Porque por ejemplo, en un caso en el que se emiten partículas con un tamaño que supere el radio crítico en una determinada región de la atmósfera, en la que ya existían mayormente núcleos de condensación naturales con un tamaño menor al radio crítico; la primera conclusión que surge a la luz de lo visto, es que la emisión impactará aumentando las precipitaciones. Pero esto no es totalmente cierto, porque dependerá de la cantidad de partículas emitidas. Se debe tener en cuenta que dentro de un volumen determinado de aire atmosférico, la cantidad de agua presente es fija, y si la cantidad de núcleos de condensación introducidos en él es suficientemente alta, puede saturarlo, y el agua disponible en el mencionado volumen para repartir entre todas las partículas será insuficiente, por lo que el efecto de la formación de gotas de nubes o lluvias por el tamaño se verá afectado en su eficiencia por la saturación de núcleos de condensación introducidos en el volumen de aire atmosférico.

Es decir, tanto el tamaño, como la cantidad de partículas emitidas a la atmósfera, de acuerdo con sus valores, pueden impactar aumentando o disminuyendo las precipitaciones.

Existe un número crítico máximo de partículas por metro cúbico de aire atmosférico que se pueden emitir sin producir saturación, que está dado por la ecuación ^{1 (10)}:

$$N_c = \frac{\eta}{mol} \frac{0,000248}{w} \left[\frac{\rho_s}{M_s} \frac{(-0,0175 \frac{T}{K} + 12,4063)}{w.T} \right]^3 m^{-3} \quad (2)$$

Se puede observar en la ecuación (2), que el número máximo de partículas por metro cúbico que se pueden emitir sin producir saturación depende del peso atómico o molecular M_s de la sustancia emitida, de su densidad ρ_s , el número de moles η , de la temperatura T del aire atmosférico circundante y de su relación de mezcla w .

Es importante notar que el número máximo de partículas por metro cúbico de aire atmosférico que se puede emitir sin saturarlo, depende de las características de las especies emitidas y de las condiciones de temperatura y humedad en que se encuentra la atmósfera circundante.

¹Pérez RC. “El rol de la concentración de partículas emitidas a la atmósfera en los impactos sobre los procesos de formación de nubes y precipitaciones”. Memorias del VIII Congreso Latinoamericano de Ciencias Ambientales y IX Congreso Chileno de Física y Química Ambiental. Pucón, Chile, 2015

No debe perderse de vista que independientemente que el tamaño de las partículas en relación con el radio crítico sea mayor o menor, si se satura el volumen de aire atmosférico con las partículas emitidas, se impactará sobre las precipitaciones del lugar, disminuyendo la cantidad caída con respecto a sus procesos naturales anteriores.

1.3. Lluvia ácida

En el contexto descripto, parece casi una obviedad la mención de un impacto ambiental anexo de los procesos expuestos: es el que corresponde al caso cuando las partículas sólidas emitidas presentan características de acidez importante. En tal caso, la formación de nubes y precipitación por estos núcleos de condensación darán lugar a la producción de lluvia ácida que al llegar al suelo impactará en el pH de la tierra, en el agua y la vegetación del lugar.

2. METODOLOGÍA Y EQUIPAMIENTO

Afortunadamente, los impactos en los regímenes de precipitación que producen los procesos descriptos son mitigables y reversibles. La metodología más utilizada a nivel mundial y aceptada por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) es conocida como **siembra de nubes**.

El modelo conceptual teórico de este procedimiento consiste en introducir núcleos sólidos (CCN) artificialmente en las nubes, para que, de acuerdo con los resultados que se desean obtener, aumentando o disminuyendo el régimen de precipitaciones de una región determinada, se ingresen a las nubes cantidades de partículas por debajo o por encima del valor del número crítico dado por la ecuación (2); con un tamaño superior o inferior al valor del radio crítico calculado por la ecuación (1).

Por ejemplo, si se desea incrementar la cantidad de lluvia, debe “sembrarse” la nube con partículas cuyo tamaño sea mayor al de una esfera con radio equivalente al valor crítico y concentraciones por debajo del valor del número crítico N_c .

Una segunda cuestión es cómo hacer llegar las partículas eficientemente en tiempo y forma a la región de génesis de gotas de la nube. La respuesta a esto es que existen varios métodos operativos, que dependen de la altura sobre el nivel del mar de la región en que se desea practicar las tareas de modificación artificial benéfica; como así también del tipo de precipitación. Así, para combatir el granizo, con zonas de siembra entre los 4.000 m. a 7.000 m. las formas más eficientes son la utilización de aviones (USA), o cohetes (Rusia). Por el contrario, si se desea incrementar nevadas en la alta montaña para desarrollar acuíferos sustentables, basta con la utilización de generadores de partículas ubicados en el suelo.

También se pueden introducir núcleos a la nube que por sus características químicas, bajen la acidez de las lluvias ácidas.

1. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

Las metodologías operativas de siembra de nubes para combatir los daños que provocan los impactos negativos en el cambio de las precipitaciones, tienen un amplio fundamento científico y más de cincuenta años de experiencia en todo el mundo; no obstante queda mucho por investigar y nuevas metodologías operativas por diseñar.

Estas metodologías siempre tienen altos costos operativos, por lo que es siempre conveniente realizar un riguroso estudio de costos-beneficios antes de encarar un emprendimiento de este tipo.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Aitkinson BW. Dynamical meteorology. Ed. Methuen. London and New York. 1981.
2. Houze Jr. Robert A. Cloud Dynamics. Academic Press. San Diego. 1993.
- Ladyzhenskaya, O. The mathematical theory of viscous incompressible flows. 2nd ed. Gordon and Breach, Cambridge 1969.
3. Pérez RC. Dinámica Atmosférica y los Procesos Tormentosos Severos. Lambert Academic Publishing (LAP). GmbH & Co, 2011.
4. Pérez RC. Física de los fenómenos atmosféricos y meteorológicos. AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG, 2013.
5. Pruppacher HR, Klett JD. "Microphysics of Clouds and Precipitation. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht: Holland/Boston: USA. London: England, 1980.
6. Ray Peters S, Mesoscale meteorology and forecasting". American Meteorological Society, Boston. 1986.
7. Rogers R. Física de las Nubes. Editorial Reverté, 1977.
8. Seinfeld John H, Spyros N. Pandis. Atmospheric chemistry and physics From Air Pollution to Climate Change. John Wiley & Sons, 1998.
9. Sedunov YD. Physics of drop formation in the atmosphere. John Wiley, 2001.